

Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Выбор критической плотности энергии при тонком измельчении // Обогащение руд. – С.-Пб.: – 2007, – № 5. – С. 7 – 10. **3.** Аперидический датчик для регистрации акустических сигналов: А.с. 512602 СССР / В.Н. Бовенко, В.И. Полуни (СССР). – Оpubл. 30.08.76, Бюл. №16. – 2 с. **4.** Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 27. – С. 33 – 41. **5.** P.I. Pilov, L.J.Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles // Науковий вісник НГУ. – 2008, № 6. – С. 23 – 26. **6.** Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. О физических критерия разрушения и диспергирования // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 28. – С. 26 – 32.

Поступила в редколлегию 11.09.08

УДК 668.98

**М. ЦИАК**, канд. техн. наук, **С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук,  
Университет Варминского-Мазурский в Ольштыне, Польша

## **КОМПРОМИССНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА**

Побудовані та проаналізовані експериментально-статистичні моделі для оптимізації впливу модифікуючих добавок та параметрів зернового складу на показники якості бетонів, що самоуплотнюються.

Created and analyzed experimental-statistical models for optimization of modificative add-mixtures influence and granulometric composition parameters to quality index of self-compacting concrete.

**Введение.** Самоуплотняющийся бетон – *Self-Compacting Concrete* (SCC) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях [1]. Высокая эффективность SCC способствовала созданию рабочей группы RILEM (1996) для разработки рекомендаций по использованию SCC. В 2004 году организован технический комитет 205-DSC “Долговечность самоуплотняющегося бетона”. В результате исследований была разработана классификация самоуплотняющихся бетонов (*Specification and Guidelines for SCC*), определяющая их назначение и области применения.

Как правило, для выполнения условий самоуплотнения состав обычного бетона должен быть существенно усложнен за счет введения специальных химических и минеральных добавок (с размером дисперсных частиц  $< 0,125$  мм – микрокремнезем, зола-унос, молотый кварцевый песок и др.), многофракционного заполнителя. Характерно, что в случае SCC требования к прочности не всегда являются первостепенными (так как обеспечиваются высокой водоредуцирующей способностью поликарбоксилатных и других «мощных» суперпластификаторов, снижающих В/Ц до 0,3 – 0,4); приоритетными становятся показатели диаметра и времени расплыва смеси под собственной массой, водоотделения, вытеснения воздуха и сегрегации. Пылевидные компоненты, присутствующие в количестве не менее 35 % объёма смеси, стабилизируют и повышают её вязкость, удерживая зерна крупного заполнителя; при этом смесь в присутствии СП расплывается без вибрации.

Пока не существует общепризнанной методики подбора состава SCC, требования к его качеству сформулированы в общем виде; существующие рекомендации построены на новых экспериментальных тестах («L-Box Test», «U-Funnel Test» и др.), имитирующих поведение смеси в конструкции [2, 3]. Разработки составов и испытания, применимые к обычным бетонам, не отражают всех свойств SCC (что приведёт, вероятно, в будущем к противоречию с существующими нормативными документами).

Принимая концепцию проектирования самоуплотняющегося бетона как грубодисперсного композиционного материала, теоретический анализ можно вести в отношении двухкомпонентной системы – минеральная матрица и «каркас» заполнителей. Факторы, влияющие на свойства каркаса – форма, поверхность и рельеф зерен, плотность, соотношение и др. Факторы, определяющие свойства «матрицы» – химические добавки, состав и дисперсность цемента, минеральных добавок, их совместимость и др.

Многокомпонентность состава и значительное количество критериев качества определяют бетоны типа SCC как «удачный» объект для моделирования и многопараметрической оптимизации, особенно при оценке возможности использования новых компонентов и необходимости уменьшения интеллектуальных, материальных и временных затрат на проектирование.

При исследовании моделей выявляются оптимальные концентрации добавок  $z_{i\text{opt}} = f(x_j)$ , области экстремума значений свойств  $Y_i \text{ max}$  и  $Y_i \text{ min}$ , допустимых  $\Omega_d$  и компромиссных  $\Omega_k$  решений при нормированных показателях  $Y_j \text{ norm}$ , и решаются другие инженерные задачи [4].

Для анализа влияния факторов и оптимизации состава SCC использованы экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные при реализации 27 опытных точек (составов) по D-оптимальному плану эксперимента  $Na_5$ . В группе факторов управления свойств «матрицы» изменялись на трех уровнях дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора BV-10 ( $SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4$  % от массы цемента), содержание наполнителя (Н) – золы уноса фильтров ТЭС, «ropiół lotny», в диапазоне ( $P_{op} = 30 \pm 10$  %) и водоцементное отношение ( $C/W = 0,43 \pm 0,03$ ). Свойства «каркаса» регулировались долей песка в смеси заполнителя ( $P_p = 50 \pm 5$  %) и содержанием мелкой фракции щебня 4 – 8 мм в крупной 8 – 16 мм: ( $Z_d = 50 \pm 10$  %). Водосодержание смесей менялось от 172 до 196  $dm/m^3$ , расход дорожного цемента СЕМ I 42,5 HSR/NA постоянный  $C = 400$   $кг/м^3$ .

В соответствии с рекомендациями EFNARC [3] экспериментально определялись диаметр расплыва бетонной смеси  $D$ , см, время  $T_{50}$  и  $T_{70}$  расплыва до  $D_1 = 50$  см и  $D_2 = 70$ , показатель сегрегации  $SR$  (как процентное отношение растворной части смеси в нижней и верхней части вибрированного вертикально трубчатого образца), воздухововлечение  $ВВ$ , а также прочность затвердевшего бетона  $R$  в возрасте 3 и 28 суток нормального твердения.

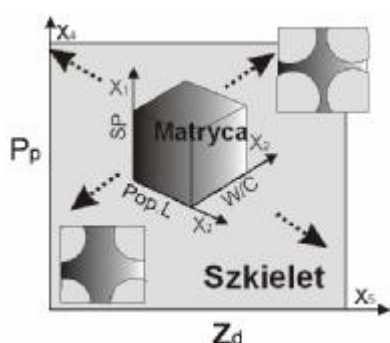


Рис. 1. Схема поиска рецептурных решений

Схема на рис.1 отражает один из принципов поиска оптимальных составов по ЭС-моделям [4]. В ходе компьютерного анализа поле свойств «матрицы» в координатах факторов СП, Н и В/Ц, перемещается по локальному полю, формируемому факторами управления «каркасом» заполнителя. С позиций анализа структуры, в этом случае, меняются условия модификации матрицы, объем межзернового пространства, крупность зерен и т.п.

Так, для расплыва конуса смеси получена (при ошибке эксперимента  $s_3 = 1,7$  см и одностороннем риске  $\alpha = 0,2$ ) структурированная модель второго порядка, в которой выделены блоки двух подсистем факторов.

Блок (а), включающий оценки влияния на  $D$  трех факторов «матрицы» при среднем уровне факторов «каркаса», описывает локальное поле  $D(x_1, x_2, x_3)$  при  $x_4, x_5 = 0$ ; изменение этого поля с изменением количества песка и крупного заполнителя отражают блоки (b) и (c). С другой стороны, блок (b) соответствующий локальному полю  $D(x_4, x_5)$  при  $x_1, x_2, x_3 = 0$ , оце-

нивает влияние доли песка и крупности щебня при средних уровнях дозировки СП, Н и В/Ц. Блок (с) представляет изменения в эффектах взаимодействия.

$D = 69,1$

$+6,8x_1$	$\pm 0,0x_1^2$	$+4,6x_{12}$	$+5,3x_{13}$	$-1,7x_{14}$
$\pm 0,0x_2$	$-6,5x_2^2$	$\pm 0,0x_{23}$	$+2,8x_{15}$	
$+9,3x_3$	$\pm 0,0x_3^2$	(a)	$+1,8x_{24}$	
$-4,1x_4$	$-4,7x_4^2$	$-1,0x_{45}$	$\pm 0,0x_{25}$	
$-1,9x_5$	$\pm 0,0x_5^2$	(b)	$+2,3x_{34}$	
			$+1,3x_{35}$	(c)

Максимальный уровень поля (1)  $D_{am} = 79$  см, минимум  $D_{in} = 23$  см, т.е. изменение этого свойства в исследуемой области составов более чем трехкратное.

На рис.2 показано влияние пяти факторов в области минимума и максимума D, что моделирует условия «хорошей» и «плохой» рецептуры бетона [4]. Введение СП в любом случае приводит к увеличению распыла, как и повышение водосодержания бетонной смеси. Концентрация дисперсной минеральной добавки имеет оптимум  $Pop_{opt} = 32,9$  %, как и содержание песка в смеси  $Pp_{opt} = 48$  %. Аналогичный анализ  $T_{50}$  указал на удлинение времени распыла при повышении количества песка и минеральной добавки, быстро адсорбирующих жидкую фазу.

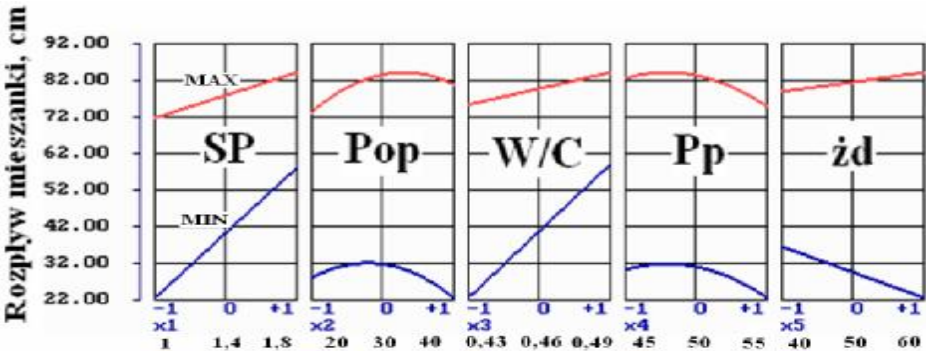


Рис. 2. Зависимости влияния факторов состава в области максимума и минимума показателя D

Одним из обобщающих показателей полей свойств материалов, характеризующих устойчивость технологии, является объем допустимой области  $0 \leq \Omega_d \leq 100$  %, относительный к исследуемому факторному пространству (в нормализованных переменных). Чем ближе значения  $\Omega$  к нулю, тем сложнее

технологу реализовать выбранное в этой области эффективное решение [5].

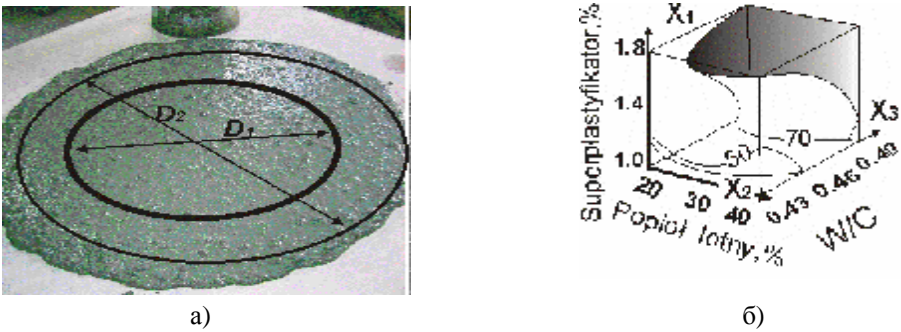


Рис. 3. Оценка характеристик расплыва D смеси (а) и диаграмма влияния факторов «матрицы» ( $x_4, x_5 = 0$ ) с выделением области  $D_2 \geq 70$  см (б)

На рис. 3б показана диаграмма влияния трех факторов матрицы на показатель расплыва  $D_2$ , определенный экспериментально (рис. 3а), при фиксированном объеме песка  $Pr = 50\%$  и 50 %-ном содержании щебня фр. 4/8. Область составов, обеспечивающих хорошую растекаемость смеси ( $D_2 \geq 70$  см), находится в зоне высоких концентраций СП ( $X_1 = 1,8\%$ ), повышенного содержания воды и средних дозировок наполнителя, занимая  $\Omega_d = 45\%$  объема факторного пространства.

По мере изменения качественного и количественного состава зерновой части, объем области допустимых решений существенно меняется: от  $\Omega_d = 5\%$  при высоком содержании песка и большом насыщении смеси крупным щебнем, до  $\Omega_d = 55\%$  при оптимальных  $Pr = 45\%$  и  $z_d = 50\%$  (рис. 4).

Одной из главных характеристик SCC является однородность бетонных смесей, которая, в свою очередь, зависит от сил связи между частицами (определяемых в бетонных смесях водосодержанием, модифицирующими добавками ПАВ и тонкодисперсными наполнителями), а

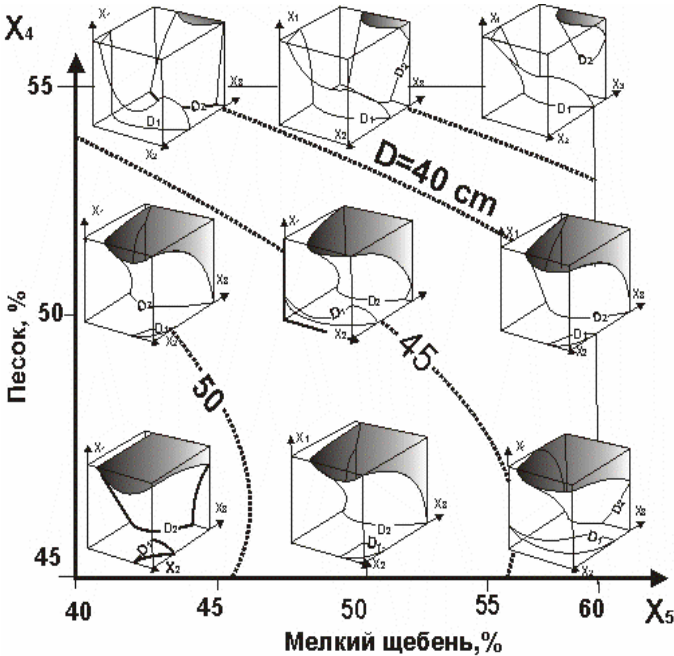


Рис. 4. Девять трехфакторных номограмм, показывающих зависимость эффективности матрицы от факторов «каркаса»

с другой – от особенностей зернового каркаса.

Введение в исследование дополнительных нормативных значений показателей качества SCC (в частности,  $SR \leq 1\%$ ,  $D \geq 70$  см,  $R_{28} \geq 60$  МПа) значительно сокращает искомые области рациональных рецептур (рис. 5).



Рис. 5. Трансформация области компромиссных решений при изменении уровней параметров «каркаса» (точки отвечают минимально допустимой концентрации  $SP$ ,  $W/C=0,43$ )

полнить требования ( $SR \leq 1\%$ ,  $D \geq 70$  см,  $R_{28} \geq 60$  МПа) практически весьма сложно без оптимизации параметров зернового состава.

Так как к наиболее дорогостоящим компонентам относятся поликарбоксилатный суперпластификатор, важна оценка возможности снижения его расхода без ухудшения качества бетонной смеси и затвердевшего бетона.

Сравнение координат точек на рис. 5 показывает, что без изменения свойств бетона за счет корректировки, в частности, количества золы уноса возможно снизить к-во СП практически в 1,2...1,3 раза.

Проведена идентификация оптимизированных составов относительно принадлежности к бетонам класса SCC. Так состав № 5 бетонной смеси (кг/м<sup>3</sup>):  $C = 400$ ,  $W = 187$ ,  $P = 756$ , щебень фр. 4/8  $\dot{z}_d = 404$ , щебень фр. 8/16  $\dot{z}_g = 431$ ,  $SP = 6$  кг,  $Por = 154$  кг обеспечивает распływ конуса  $d = 75$  см, что соответствует [2] классу SF2 по расплыву ( $d = 66...75$  см). По показателю сегрегации – класс SR2 (раствороотделение менее 5 %). Класс SF2 определен

В случае уменьшения количества мелкой фракции щебня  $\dot{z}_d$  до  $< 45\%$  и песка  $Pp < 48\%$  существенно возрастает расслаиваемость смеси; в то же время добавление песка свыше 55 % приводит к резкому ухудшению расплыва.

Если область  $\Omega$  оказывается меньше 15%, то технологические решения становятся, как правило, неустойчивыми из-за увеличения в ней доли, связанной с риском моделирования [5]. Поэтому вы-

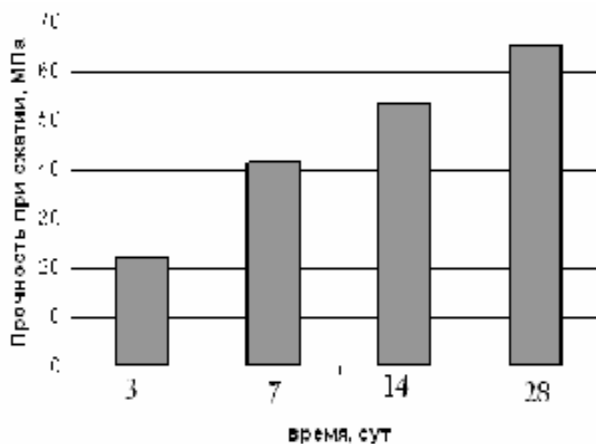


по времени расплыва  $T_{50} = 5$  с и истечению из воронки «Funnel» ( $T_v = 12$  с).

Согласно проведенного теста «L-Vox» (рис. 6а), устанавливающего способность смеси к самовыравниванию, бетонная смесь относится к классу РА2 (отклонение от горизонтали менее 0,2). Бетон достаточно быстро набирает прочность, и в «марочном» возрасте  $R^{28} = 65,3$  МПа, что соответствует классу В60.



а)



б)

Рис. 6. Тест «L-Vox» для оптимизированной смеси (а), рост во времени (б) и рост прочности бетона состава № 3

Неоспоримым преимуществам SCC противопоставляются более высокие затраты на материалы, разработку рецептуры, производство, обеспечение качества и контроль, по сравнению с обычным бетоном. Сферы применения SCC ограничены случаями, когда он может обеспечить наилучшее соотношение затрат и эффекта, например, в мостостроении, в многоэтажном монолитно-каркасном домостроении, при высоком насыщении армирующими элементами железобетонных конструкций.

**Список литературы:** 1. Aïtcin P.C.: High-Performance Concrete. E & FN SPON, 1998. 2. The European Guidelines for Self Compacting Concrete” Specification, Production and Use, 2005. 3. Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, 2002. 4. Коваль С.В. Модифицированные бетоны: моделирование и оптимизация // Строительные материалы и изделия, 2004. – № 4. – С. 20 – 24. 5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.

*Поступила в редколлегию 11.09.08*